

MARIA OLECH^{1,2}, MICHAŁ WĘGRZYN¹, MAJA LISOWSKA¹,
KATARZYNA J. CHWEDORZEWSKA², AGNIESZKA SŁABY¹

¹*Instytut Botaniki*

Uniwersytet Jagielloński,

Zakład Badań i Dokumentacji Polarnej im. Profesora Zdzisława Czeppego
Kopernika 27, 31-501 Kraków

²*Instytut Biochemii i Biofizyki PAN*

Zakład Biologii Antarktyki

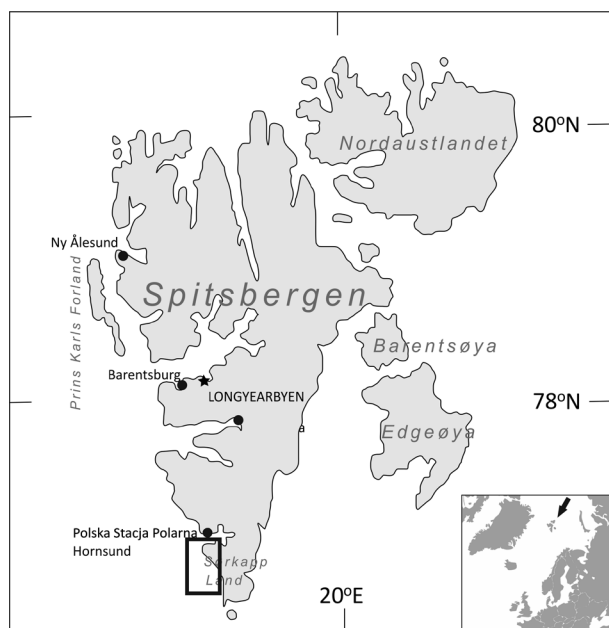
Pawińskiego 5a, 02-106 Warszawa

E-mail: maria.olech@uj.edu.pl

POLARNE EKOSYSTEMY LĄDOWE W KONTEKŚCIE ZMIAN KLIMATYCZNYCH

WSTĘP

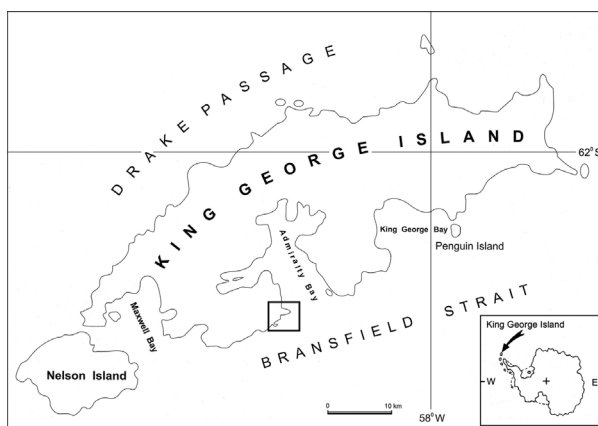
Artykuł prezentuje główne kierunki przemian zachodzących w ostatnich latach w zbiorowiskach tundrowych, w oparciu o oryginalne badania prowadzone przez polskie zespoły w Arktyce na Spitsbergenie (Ryc. 1) oraz w morskiej Antarktyce na Wyspie Króla Jerzego (Szetlandy Południowe) (Ryc. 2).



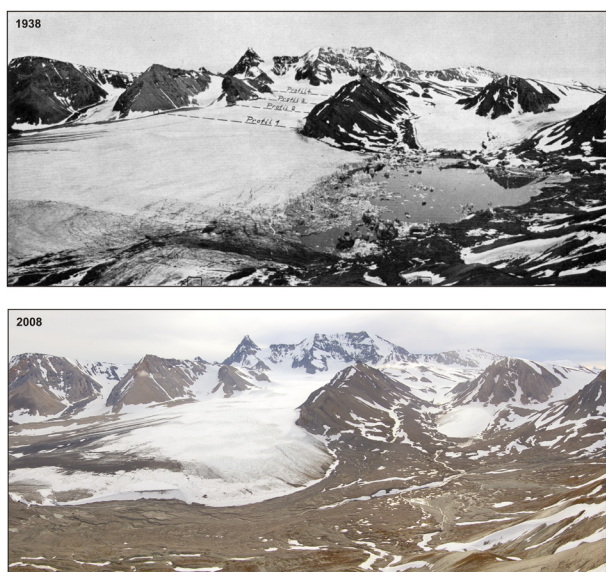
Ryc. 1. Spitsbergen (archipelag Svalbard, Arktyka), prostokątem zaznaczony teren badań.

Gwałtowne zmiany klimatyczne, jakie w ostatnich latach obserwuje się w obu polarnych rejonach Ziemi istotnie wpływają na funkcjonowanie ekosystemów lądowych.

Globalne zmiany klimatu w ostatnich dziesięcioleciach są szeroko udokumentowane oraz monitorowane. Ocieplenie w skali światowej jest najbardziej widoczne od lat 70-tych XX w.: średnia roczna temperatura na świecie wzrosła w latach 1901–1940 o 0,35°C, a w latach 1970–2007 roku o 0,55°C. Dekada 2000–2009 była najcieplejszą w



Ryc. 2. Wyspa Króla Jerzego (archipelag Szetlandów Południowych, Antarktyka), prostokątem zaznaczony teren badań.



Ryc. 3. Recesja lodowca Gsbreen (Spitsbergen, Arktyka) w latach 1938-2008 (wg ZIAJA i współaut. 2011).

ostatnich dziesięcioleciach (MENNE i KENNEDY 2010).

Zmiany klimatu mają najgwałtowniejszy charakter w obszarach polarnych obu półkul. Silne ocieplenie w Arktyce zaczęło być widoczne od lat 90. XX w.: średnia roczna temperatura powietrza w tym rejonie wzrosła w latach 1995–2005 o ponad 1°C w stosunku do średniej z okresu 1951–1990 (PRZYBYŁAK 2007). Obecnie, właśnie w Arktyce, obserwowany jest największy w skali światowej wzrost temperatury (MENNE i KENNEDY 2010). Także niektóre rejony Antarktyki należą do najbardziej ocieplających się miejsc na Ziemi. Dotyczy to zwłaszcza morskiej Antarktyki, a szczególnie zachodniej części Półwyspu Antarktycznego, gdzie w okresie ostatnich 50 lat temperatura wzrosła średnio o 2°C (TURNER i współaut. 2005).

Regionalny wzrost temperatury jest ściśle związany ze wzrostem dostępności niezwiązanej wody w ekosystemie, powodując szybsze topnienie lodowców i pokrywy śnież-

nej (FOX i COOPER 1998, TURNER i współaut. 2005). Ocieplenie powoduje również w wielu rejonach wzrost ilości opadów, które coraz częściej zaczynają występować w postaci deszczu, czyli w formie natychmiast dostępnej dla organizmów żywych (FOX i COOPER 1998, VAUGHAN i współaut. 2001, BIRKENMAJER 2002, ARNOLD i współaut. 2003).

Wzrost opadów deszczu zwiększa ponadto tempo topnienia lodowców. Może to w konsekwencji prowadzić do szybszego wyczerpywania się zapasów wody w ekosystemach lądowych i powodować lokalne susze, szczególnie pod koniec sezonu letniego (FOWBERT i LEWIS-SMITH 1994, FOX i COOPER 1998, VAUGHAN i współaut. 2001). Natomiast zimą wzrost temperatury może prowadzić do okresowych roztopów, a następnie do tworzenia się skorupy lodowej na powierzchni gleby (ARNOLD i współaut. 2003), co wpływa bardzo negatywnie na przetrwanie roślin i wielu organizmów glebowych (CONVEY 2003).

Wiele danych wskazuje na to, że ekosystemy lądowe obszarów polarnych to środowisko bardzo stabilne, niepodlegające gwałtownym przemianom (JÓNSDÓTTIR 2005, PRACH i współaut. 2010). Okazuje się jednak, iż w wielu rejonach zmiany w roślinności zachodzą zdumiewająco szybko, często w przeciągu 20-30 lat (MOREAU i współaut. 2009, OLECH 2010, ZIAJA i współaut. 2011).

Najbardziej spektakularną formą zmian w obszarach polarnych jest kolonizacja i sukcesja na odsłaniających się przedpolach lodowców. Proces recesji lodowców Arktyki i Antarktyki jest uważany za jedną z najważniejszych konsekwencji zmian klimatu. W wyniku recesji lodowców odsłaniane są ogromne powierzchnie lądu pozbawione jakiegokolwiek roślinności (Ryc. 3). Taka sytuacja umożliwia uruchomienie procesów kolonizacji nowych terenów, a proces formowania się zbiorowisk tundrowych może być śledzony od jego najwcześniejszych etapów.

EKOSYSTEMY LĄDOWE REJONÓW POLARNYCH

Surowy klimat obszarów polarnych sprawia, że w zbiorowiskach tundrowych dominują organizmy zarodnikowe: porosty, mszaki, glony. Organizmy te znakomicie przystosowane są do niskiej temperatury w bardzo krótkim okresie wegetacyjnym, długich okresów zalegania śniegu oraz bardzo ubożego

w substancje odżywcze, a miejscami nawet zupełnie jałowego podłoża.

W kształtowaniu się zbiorowisk roślinności polarnej ważną rolę pełni specyfika formowania się i funkcjonowania gleb. Wieloletnia zmarzlina oraz powolne tempo rozkładu materii organicznej sprawiają, że gleby w

Arktyce i Antarktyce najczęściej mają charakter inicjalny, o słabo wykształconym profilu. Proces wietrzenia fizycznego przeważa nad chemicznym. Powszechnie zachodzi sortowanie mrozowe, prowadzące do tworzenia się gleb kriogenicznych z charakterystycznymi poligonami, częste jest również zjawisko soliflukcji. Faworyzuje to organizmy zarodnikowe, które są mniej zależne od żyzności podłoża niż rośliny kwiatowe. Obserwowane w ostatnich dekadach postępujące wytapianie się wieloletniej zmarzliny wpływa na zmiany zbiorowisk roślinnych.

Tam, gdzie produkcja pierwotna jest niewielka, a procesy rozkładu materii są bardzo powolne, dostępność pierwiastków biogenych jest znikoma. Istnieją jednak dodatkowe źródła makroelementów, lokalnie wzbogacające glebę. Obecność ptaków morskich, których odchody użyźniają teren wokół ich kolonii lęgowych, przyczynia się do powstawania specyficznych zbiorowisk roślinnych określanych mianem ornitokopofilnych. Tworzą je gatunki, które preferują dużą zawartość związków mineralnych w podłożu, głównie azotu. Stabilność tych zbiorowisk jest bezpośrednio związana ze stałą dostawą

nawozu. Zmiany liczebności populacji ptaków mogą bezpośrednio wpływać na strukturę tych zbiorowisk.

Pomimo licznych podobieństw, roślinność tundrowa Arktyki i Antarktyki posiada odmienną specyfikę. Najważniejszą cechą różnicującą jest liczba gatunków roślin kwiatowych. W Arktyce występuje około 1800 gatunków, natomiast w Antarktyce zaledwie 2 rodzime gatunki: trawa *Deschampsia antarctica* i, należący do rodziny Caryophyllaceae, *Colobanthus quitensis*. Obie te rośliny spotykane są tylko w Antarktyce morskiej, na kontynencie antarktycznym brak jest ich zupełnie. Istotną różnicą jest również brak w Antarktyce roślinożerców, w przeciwieństwie do Arktyki, gdzie w kształtowaniu tundry arktycznej dużą rolę pełnią renifery, karibu oraz inne gatunki ssaków oraz ptaków roślinożernych. W obu obszarach polarnych ważnym czynnikiem w kształtowaniu specyficznych zbiorowisk ornitokopofilnych jest obecność kolonii lęgowych ptaków morskich. Jednakże w obszarach antarktycznych czynnik ten zaznacza się o wiele bardziej niż w Arktyce.

WPŁYW ZMIAN KLIMATYCZNYCH NA EKOSYSTEMY ARKTYKI

W ciągu ostatnich dekad obserwuje się daleko idące przekształcenia zbiorowisk arktycznej tundry. Ocieplenie klimatu, a co za tym idzie, wzrost produkcji pierwotnej (JÓNSDÓTTIR 2005), stymulują rozwój populacji roślinożerców, których działanie przekształca w sposób istotny tundrowe zbiorowiska roślinne w Arktyce. Wyniki prowadzonych ostatnio badań porównawczych na południu Spitsbergenu po 25 latach wskazują na daleko idące przemiany w zbiorowiskach roślinnych, na skutek zwiększającej się presji reniferów. Porównawcze kartowanie zbiorowisk roślinnych na północno-zachodnim wybrzeżu Sørkapp Landu (południowy Spitsbergen) przeprowadzono w 2008 r. (ZIAJA i współaut. 2011). Badania te wykonano w oparciu o wyniki kompleksowych badań fitosocjologicznych z lat 80. XX w. (DUBIEL i OLECH 1985, 1990, 1991), w wyniku których powstała mapa zbiorowisk roślinnych tego terenu. Wykonano serię zdjęć fitosocjologicznych metodą Braun-Blanqueta, których wyniki zestawiono następnie z danymi z prac historycznych. Efektem porównania było przygotowanie uaktualnionej mapy roślinności

północno-zachodniego Sørkapp Landu (ZIAJA i współaut. 2011).

Gwałtowna ekspansja renifera na terenie północno-zachodniego wybrzeża Sørkapp Landu [od 1–2 sztuk w latach 80. do ponad 100 sztuk zauważonych w 2000 r. (ZIAJA 2002) i aż do około 170 w trakcie prowadzenia badań w 2008 r.] wpłynęła bardzo znacząco na zmiany w strukturze i rozmieszczeniu zbiorowisk roślinnych. Jedną z najbardziej spektakularnych zmian jakie zaszły na badanym terenie jest całkowita degradacja zbiorowisk wielkoplechowych porostów naziemnych (Ryc. 4, 5). Krzaczkowate porosty z rodzaju *Cladonia*, *Cetraria* i *Flavocetraria*, dotychczas dominujące w suchych siedliskach (DUBIEL i OLECH 1990, 1991) (Ryc. 4), zostały całkowicie wyeliminowane przez żerujące renifery (Ryc. 5). Obecnie duże, nieuszkodzone plechy tych porostów spotkać można jedynie na bardzo stromych zboczach gór oraz w innych miejscach niedostępnych dla reniferów. W płatach zdegradowanego zbiorowiska *Flavocetraria nivalis*-*Cladonia rangiferina* zaobserwowano natomiast ekspansję turzycy *Luzula arcuata* (Ryc. 6). Ro-



Ryc. 4. Zbiorowisko porostów wielkoplechowych *Flavocetraria nivalis* – *Cladonia rangiferina*, Sørkapp Land, Spitsbergen, 1982 (fot. M. Olech).

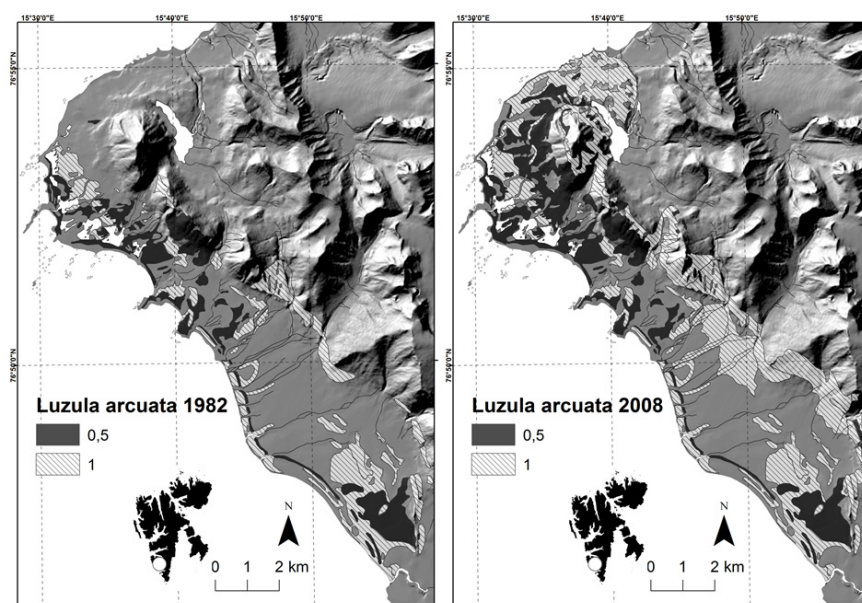


Ryc. 5. Zdegradowana postać zbiorowiska *Flavocetraria nivalis* – *Cladonia rangiferina*, Sørkapp Land, Spitsbergen, 2008 (fot. M. Lisowska).

ślina ta poprzednio, wskutek konkurencji ze strony naziemnych porostów krzaczkowych, była prawdopodobnie przez nie zagłuszana. Zanik porostów umożliwił jej rozprzestrzenianie się.

Kartowanie zbiorowisk roślinnych, dzięki któremu tworzone są mapy roślinności obszarów arktycznych, to jeden z głównych sposobów charakteryzowania stanu roślinności w danym okresie. Powtarzanie badań stwarza natomiast możliwość wykrywania i opisywania przemian roślinności.

Na terenach odsłanianych spod lodu wskutek przyspieszonej recesji lodowców formują się nowe zbiorowiska roślinne. Odsłaniające się podłoże pozbawione jakichkolwiek form życia staje się obszarem rozpoczynających się procesów kolonizacji i sukcesji pierwotnej organizmów zarodnikowych i roślin kwiatowych. W ostatnich dekadach prowadzi się coraz więcej badań związanych z kolonizacją i sukcesją pierwotną na przedpolach lodowców Arktyki. Pierwsze prace z terenu Spitsbergenu są polskiego autorstwa i pochodzą z połowy XX w. (KUC 1964). W latach 70. XX w. zapoczątkowano badania roślinności i gleb na przedpolu lodowca Werenkiöldbreen w pobliżu Polskiej Stacji Polarnej (FABISZEWSKI 1975, PIROŻNIKOW i GÓRNIAK 1992), które w chwili obecnej nadal są kontynuowane (WOJTUŃ i współaut. 2008). Od lat 80. XX w. prowadzi się również intensywne badania na przedpolach lodowców w pobliżu międzynarodowego kompleksu stacji badawczych w Ny Ålesund, na północno-zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu (m.



Ryc. 6. Udział *Luzula arcuata* w zbiorowiskach roślinnych w latach 1982 i 2008, Sørkapp Land, Spitsbergen (wg OLECH i współaut. 2011, zmniejszona).

in. HODKINSON i współaut. 2003, MOREAU i współaut. 2005). Na środkowym Spitsbergenie studia nad sukcesją roślin naczyniowych prowadzili ZIAJA i DUBIEL (1996).

W celu opisanie przebiegu procesów kolonizacji i sukcesji pierwotnej na przedpolach lodowców z uwzględnieniem zwłaszcza mszaków i porostów, przeprowadzono w 2008 r. badania w rejonie Hornsundu na południowym Spitsbergenie, na przedpolu lodowca Gåsbreen (OLECH i współaut. 2011). Zastosowano metodę chronosekwencji, prowadząc ciągły transekt zdjęć fitosocjologicznych od czoła lodowca do najstarszych moren. Uzyskano w ten sposób obraz przemian roślinności na całej długości przedpoła lodowca. Kolonizacja rozpoczęła się na obszarze, który został odsłonięty spod lodu około 25 lat wcześniej. Pierwszymi kolonizatorami

były rośliny kwiatowe, których udział w zbiorowiskach wzdłuż całego transektu był również duży. W następnej kolejności pojawiły się mszaki, z których pierwszymi były *Bryum pseudotriquetrum* i *Brachythecium turgidum*. Pierwszymi gatunkami porostów były naskalne gatunki: *Polyblastia cupularis* i *Protoblastenia rupestris*. W starszej części transektu do niewielkich gatunków z rodzajów *Polyblastia*, *Thelidium* i *Verrucaria* dołączyły gatunki o większych plechach, np. *Xanthoria elegans* i *Aspicilia* spp. Pojawiły się również kolejne gatunki mchów, w tym dominująca na transekcie pod względem obfitości *Andraea blyttii*. Sekwencja pojawiania się kolejnych grup organizmów na przedpolu lodowca Gåsbreen okazała się ogólnie zbliżona do tych obserwowanych w innych miejscach Spitsbergenu (MOREAU i współaut. 2005).

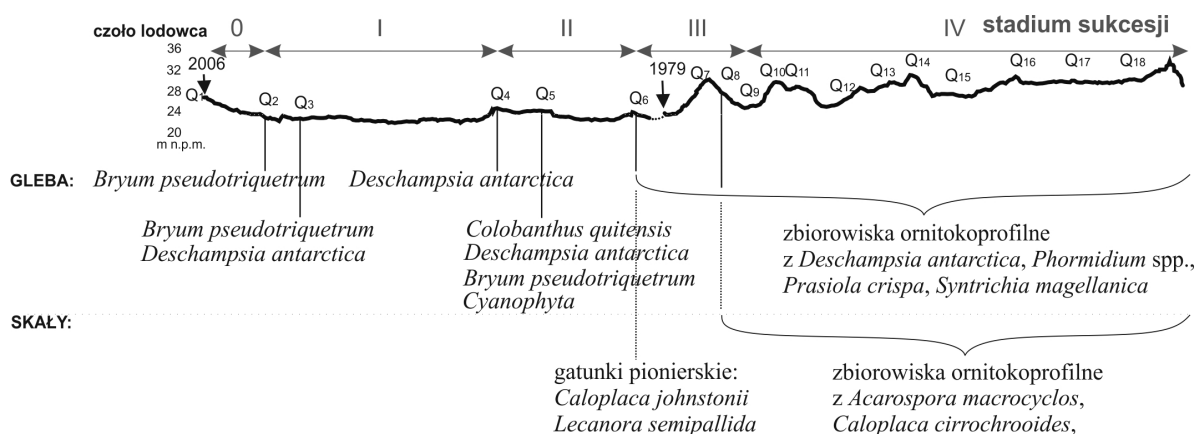
KONSEKWENCJE ZMIAN KLIMATYCZNYCH W MORSKIEJ ANTARKTYCE

Zmiany klimatyczne wywarły już znaczący i mierzalny wpływ na praktycznie wszystkie elementy ekosystemów lądowych morskiej Antarktyki, wpływając na procesy i interakcje ekologiczne, rozmieszczenie gatunków, skład zbiorowisk itp. Jak wykazują badania, złagodnienie klimatu antarktycznego stymuluje wzrost różnorodności biologicznej, zwiększanie produkcji biomasy, wpływa na powstanie nowych, bardziej złożonych zależności troficznych, w rezultacie zmienia całe ekosystemy lądowe (OLECH i SŁABY 2010).

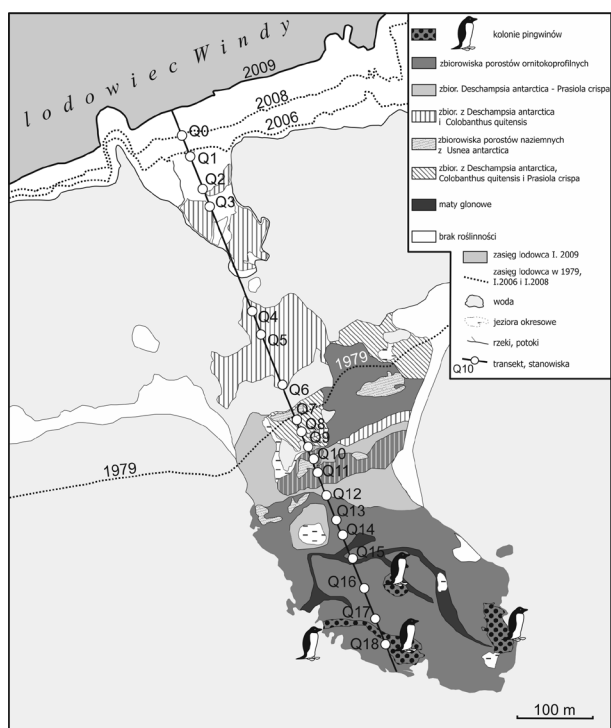
Najlepiej widocznym przykładem konsekwencji zmian klimatycznych w tym rejonie

jest wzrost liczebności populacji i rozszerzanie zasięgów antarktycznych roślin kwiatowych *Deschampsia antarctica* i *Colobanthus quitensis* (FOWBERT i LEWIS-SMITH 1994, OLECH 2008, VERA 2011, OLECH i SŁABY 2010). Obserwowana jest również u tych gatunków zmiana strategii rozrodczych, przede wszystkim wzrost rozmnażania generatywnego w stosunku do wegetatywnego, wzrasta tym samym produkcja nasion, pojawia się również większa liczba siewek i rośnie ich przeżywalność (KELLMANN-SOPYŁA i współaut. 2011).

Na Wyspie Króla Jerzego w Antarktyce morskiej prowadzone są długoletnie, moni-



Ryc. 7. Sukcesja roślinności na przedpolu lodowca Windy, Wyspa Króla Jerzego, Antarktyka (wg OLECH i współaut. 2011, zmieniona).



Ryc. 8. Zbiorowiska roślinne na przedpolu lodowca Windy, Wyspa Króla Jerzego, Antarktyka (wg OLECH i współaut. 2011, zmieniona).

toringowe badania kolonizacji i sukcesji pierwotnej na przedpolach lodowców (OLECH 2010). Badania prowadzone są w oparciu o metodę chronosekwencji – ciągłych transektów zdjęć fitosocjologicznych od czoła lodowca do najstarszych moren. Ostatnie badania przedpola lodowca Windy, przeprowadzone w 2006 r., dostarczyły szczegółowych danych na temat kolonizacji oraz sukcesji pierwotnej na tym obszarze (OLECH i współaut. 2011). Kolonizacja zaczyna się kilka lat od momentu wycofania się lodowca, ok. 50 m od czoła lodowca (Ryc. 7, 8). Do pierwszych kolonizatorów należy mech *Bryum pseudotriquetrum*, a następnie trawa *Deschampsia antarctica* (I stadium sukcesji). Pierwsi kolonizatorzy z grupy porostów naskalnych (*Caloplaca johnstoni*, *C. sublobula-*

ta, *Lecanora* spp.) pojawili się w III stadium sukcesji (Ryc. 7). IV stadium sukcesji uwiadacza ogromny wpływ kolonii pingwinów, które występują w rejonie półwyspu Patelnia (Ryc. 8). Dominują tu ornitokoprowalne zbiorowiska porostów naskalnych, a na glebie nitrofilne glony (*Prasiola crispa*, *Phormidium* spp.) i mchy (*Syntrichia magellanica*).

Podobny model sukcesji obserwuje się na przedpolach innych lodowców na Wyspie Króla Jerzego (OLECH 2008, OLECH i MASSALSKI 2001).

W celu uzyskania bazy dokładniejszych danych dla śledzenia przemian zachodzących w zbiorowiskach tundrowych Antarktyki prowadzi się badania fitosocjologiczne i kartowanie terenów wolnych od lodu, czego przykładem jest mapa roślinności przedpola Lodowca Windy na Wyspie Króla Jerzego (Ryc. 8). Kartowanie w terenie poprzedzone było wykonaniem zdjęć fitosocjologicznych sporządzonych według klasycznej metody Braun-Blanqueta. Metodyka fitosocjologiczna znakomicie nadaje się do monitorowania stanu roślinności i śledzenia zmian w składzie i rozmieszczeniu zbiorowisk roślinnych w czasie. Mapa rozmieszczenia zbiorowisk tundry na przedpolu Lodowca Windy stanowić będzie bazę do przyszłych badań porównawczych dotyczących zmian pod wpływem ocieplenia klimatu.

Do istotnych konsekwencji ocieplenia się klimatu w zachodniej Antarktyce należy pojawienie się gatunków obcych. Agresywne, plastyczne organizmy, o dużym potencjale adaptacyjnym mogą szybko przystosować się do coraz bardziej łagodnych warunków klimatycznych, rozpoczynając kolonizację ocieplającej się Antarktyki. Mogą wchodzić w interakcje z gatunkami rodzimymi, które długo ewoluowały w izolacji by przystosować się do specyficznych warunków klimatycznych i nie są w stanie dostosować się ani do tak nagłych wahań klimatu, ani do konkurencji ze strony przybyszów (BARGAGLI 2005, OLECH i CHWEDORZEWSKA 2011).

POLARNE EKOSYSTEMY LĄDOWE W KONTEKŚCIE ZMIAN KLIMATYCZNYCH

Streszczenie

Gwałtowne zmiany klimatyczne ostatnich dekad, które szczególnie mocno zaznaczają się w rejonach polarnych Ziemi, wpływają, w sposób bezpośredni bądź pośredni, na funkcjonowanie ekosystemów lądowych. Topnienie lodowców powoduje odsłanianie się nowych terenów, które są zasiedlane w procesie

sukcesji pierwotnej. Zmienia się skład gatunkowy zbiorowisk tundrowych, wkraczają nowe, obce gatunki. Wykrywanie i śledzenie kierunków oraz tempa zachodzących przemian możliwe jest dzięki długoterminowym programom badawczym. Artykuł prezentuje wyniki oryginalnych badań prowadzonych

przez polskie zespoły w Arktyce oraz w morskiej Antarktyce, które dokumentują główne kierunki prze-

mian zachodzących w ostatnich latach w roślinności tundrowej.

TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF THE POLAR REGIONS UNDER INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES

Summary

Rapid climate changes observed during the last decades, which are especially visible in the polar regions, both directly and indirectly influence terrestrial ecosystems. Glacier retreat causes emerging of new areas that are later colonized in the process of primary succession. Species composition of tundra communities is changing and expansion of alien

species is being observed. Due to long-term research programs, it is possible to detect and follow trends and rate of the ongoing changes. The article presents results of original research carried out by Polish teams in the Arctic and in the Antarctic, which document the main directions of recent changes in tundra vegetation.

LITERATURA

- ARNOLD R. J., CONVEY P., HUGHES K. A., WYNN-WILLIAMS D. D., 2003. *Seasonal periodicity of physical factors, inorganic nutrients and microalgae in Antarctic fellfields*. Polar Biol. 26, 396–403.
- BARGAGLI R., 2005. *Antarctic ecosystems*. Ecol. Studies 175, Springer, Berlin.
- BIRKENMAJER K., 2002. *Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetlands, West Antarctica), 1956–2001*. Bull. Pol. Acad. Sci. Earth Sci. 50, 15–30.
- CONVEY P., 2003. *Soil faunal community response to environmental manipulation on Alexander Island, southern maritime Antarctic*. [W:] VIII SCAR International Biology Symposium: *Antarctic Biology in a Global Context* HUISKES A. H. L., GIESKES W. W. C., ROZEMA J., SCHORNO R. M. L., VAN DER VIES S. M., WOLFF W. J. (red.). Backhuys Publishers, Leiden, 74–78.
- DUBIEL E., OLECH M., 1985. *Vegetation map of the NW part of Sørkappland (Spitsbergen)*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego 756, Prace Geograficzne 63, 57–68.
- DUBIEL E., OLECH M., 1990. *Plant communities of NW Sørkapp Land (Spitsbergen)*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Botaniczne 21, 35–74.
- DUBIEL E., OLECH M., 1991. *Phytosociological map of NW Sørkapp Land (Spitsbergen)*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Botaniczne 22, 47–54.
- FABISZEWSKI J., 1975. *Migracja roślinności na przedpolu lodowca Werenskiölda. Polskie wyprawy na Spitsbergen, 1972 i 1973*. Materiały z Sympozjum Spitsbergeńskiego. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, 81–88.
- FOWBERT J. T. A., LEWIS-SMITH R. I., 1994. *Rapid Population Increases in Native Vascular Plants in the Argentine Islands, Antarctic Peninsula*. Arctic Alpine Res. 26, 290–296.
- FOX A. J., COOPER A. P. R., 1998. *Climate-change indicators from archival aerial photography of the Antarctic Peninsula*. Ann. Glaciol. 27, 636–642.
- HODKINSON I. D., COULSON S. J., WEBB N. R., 2003. *Community assembly along proglacial chronosequences in the high Arctic: vegetation and soil development in north-west Svalbard*. J. Ecol. 91, 651–663.
- JÓNSDÓTTIR I. S., 2005. *Terrestrial Ecosystems on Svalbard: Heterogeneity, Complexity and Fragility from an Arctic Island Perspective*. Biol. Environ. Proc. Royal Irish Acad. 105, 155–165.
- KELLMANN-SOPYŁA W., PASTORCZYK M., GIEŁWANOWSKA I., 2011. *Influence of environmental factors on reproduction of polar vascular plants*. Papers on Global Change IGBP 18, 63–69.
- KUC M., 1964. *Deglaciation of Treskelen-Treskelodden in Hornsund, Vestspitsbergen, as shown by vegetation*. Studia Geologica Polonica 11, 197–206.
- MENNE M. J., KENNEDY J. J., 2010. *Global Surface Temperatures [W:] State of the Climate in 2009*. ARNDT D. S., BARINGER M. O., JOHNSON M. R. (red.). Bull. Am. Meteorol. Soc. 91, 24–25.
- MOREAU M., LAFFLY D., JOLY D., BROSSARD T., 2005. *Analysis of plant colonization on an arctic moraine since the end of the Little Ice Age using remotely sensed data and a Bayesian approach*. Remote Sensing Environ. 99, 244–253.
- MOREAU M., LAFFLY D., BROSSARD T., 2009. *Recent spatial development of Svalbard strandflat vegetation over a period of 31 years*. Polar Res. 28, 364–375.
- OLECH M., 2008. *Kolonizacja i sukcesja roślinności na przedpolach lodowców w Antarktyce Zachodniej [W:] The 32nd International Polar Symposium, 4th International Polar Year*. Wrocław, 23–24 May 2008, 59–60.
- OLECH M., 2010. *Responses of Antarctic Tundra Ecosystem to Climate Change and Human Activity*. Papers on Global Change IGBP 17, 43–52.
- OLECH M., CHWEDORZEWSKA K. J., 2011. *The first appearance and establishment of an alien vascular plant in natural habitats on the forefield of a retreating glacier in Antarctica*. Antarctic Sci. 23, 153–154.
- OLECH M., MASSALSKI A., 2001. *Plant colonization and community development on the Sphinx Glacier forefield*. Folia Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Masarykianae Brunensis, Geographia, 25, 111–119.
- OLECH M., SŁABY A., 2010. *Vegetation dynamics on the deglaciated areas of Sphinx Glacier (King George Island, Antarctica)*. International Polar Year Oslo Science Conference, Oslo, 8–12.06.2010.
- OLECH M., WĘGRZYN M., LISOWSKA M., SŁABY A., ANGIŁ P., 2011. *Contemporary changes of vegetation in polar regions*. Papers on Global Change IGBP 18, 35–51.
- PIROŻNIKOW E., GÓRNIĄK A., 1992. *Changes in the characteristics of the soil and vegetation during the primary succession in the marginal zone of*

- the Werenskiöld glacier, Spitsbergen*. Polish Polar Res. 13, 19–29.
- PRACH K., KOŚNAR J., KLIMEŠOVA J., HAIŠ M., 2010. *High Arctic vegetation after 70 years: a repeated analysis from Svalbard*. Polar Biol. 33, 635–639.
- PRZYBYŁAK R., 2007. *Recent air-temperature changes in the Arctic*. Ann. Glaciol. 46, 316–324.
- TURNER J., COLWELL S. R., MARSHALL G. J., LACHLAN-COPE T. A., CARLETON A. M., JONES P. D., LAGUN V., REID P. A., IAGOVKINA S., 2005. *Antarctic climate change during the last 50 years*. Int. J. Climatol. 25, 279–294.
- VAUGHAN D. G., MARSHALL G. J., CONNOLLEY W. M., KING J., MULVANEY R., 2001. *Climate change: devil is in the detail*. Science 293, 1777–1779.
- VERA M. L. 2011. *Colonization and demographic structure of Deschampsia antarctica and Colobanthus quitensis along an altitudinal gradient on Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica*. Polar Res. 30 (Suppl.1), 7146.
- WOJTUŃ B., MATUŁA J., PEREYMA J., 2008. *Kolonizacja przedpola lodowca Werenskiölda (Spitsbergen Zachodni) przez sinice i rośliny*. [W:] *Środowisko przyrodnicze obszarów polarnych*. KO-WALSKA A., LATOCHA A., MASZALEK H., PEREYMA J. (red.). Wrocław, 228–236.
- ZIAJA W., 2002. *Zmiany w strukturze środowiska przyrodniczego Sørkapplandu [Changes in the landscape structure of Sørkappland]*. [W:] *Struktura i funkcjonowanie środowiska przyrodniczego Sørkapplandu (Spitsbergen, Svalbard)*. ZIAJA W., SKIBA S. (red.). Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 18–50.
- ZIAJA W., DUBIEL E., 1996. *Vascular plants succession during contemporary deglaciation in the mountains of Nordenskiöld Land, Spitsbergen*. [W:] *XXIII Sympozjum Polarne. Sosnowiec, 27-19 IX 1996* KRAWCZYK W. E. (red.). Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec, 99–110.
- ZIAJA W., DUDEK J., LISOWSKA M., OLECH M., OSTAFIN K., OSYCZKA P., WĘGRZYN M., 2011. *Transformation of the natural environment in Western Sørkapp Land (Spitsbergen) since the 1980s*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.